

## Praktikum Elektrotechnik 1 Elektrische Messung

### 1) Anwendung des Drehspulinstrumentes zur Strom- und Spannungsmessung.

→ Def: Drehspulinstrumente stellen auf Grund der geringen Leistungsaufnahme, der großen Empfindlichkeit und der hohen Genauigkeit die gebräuchlichsten Messungsinstrumente dar. Sie dienen der Messung von Gleichstrom.

→ Aufbau: Zwischen den Polschuhen eines Permanentmagneten befindet sich eine drehbar gelagerte Spule der Höhe „L“ und der Windungszahl „N“, die einen zylindrischen Weicheisenkern umschließt und mit einem Zeiger verbunden ist. Spiralfedern übernehmen die Rückstellfunktion des Zeiger.

→ Wirkungsweise: Die durch den Messtrom „I“ gespeiste Spule erfährt ein Kraft „F“, wobei die Spule mit ihrem Durchmesser „d“ das Drehmoment;

$$M = F \cdot d = L \cdot N \cdot d \cdot B \cdot I$$

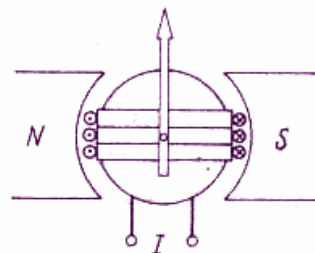
auf den Zeiger überträgt. Dieses Drehmoment ist dem der Rückstellfeder gleich. Der Drehwinkel „α“ des Zeigers ist damit dem Messtrom proportional.

$$\alpha = \frac{N \cdot d \cdot L \cdot B}{D} \cdot I$$

„D“ = Rückstell-Drehfederkonstante

Dämpfung der Zeigerschwingung durch Drehspule, Lenz'sche Regel.

Drehspulinstrument



→ Messunsicherheit: ○ Messergebnis = Messwert + Messunsicherheit  
○ umfasst systematische Fehler

(vorzeichenbehaftet, korrigierbar, hervorgerufen durch Unvollkommenheiten und Umgebungseinflüssen) und zufällige Fehler (deterministisch nicht erfassbar, Fehlerrechnung)

○ zur Erfassung von zufälligen Fehlern mehrere

Messungen nötig

○ Standardabweichung:  $s = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \cdot \sum (x_i - \bar{x})^2}$

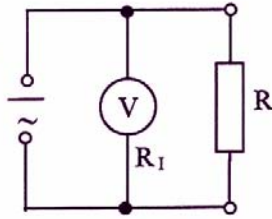
○ bei Kenntniss von Mittelwert und

Standardabweichung können „Vertrauensbereiche“, d.h. Intervalle um Mittelwert „ $\bar{x}$ “ angegeben werden, innerhalb derer mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit der wahre Wert des Mittelwertes  $\mu$  liegt.

→ Meßbereichserweiterung

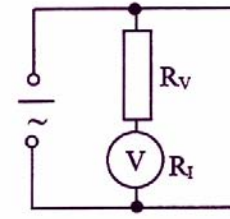
**Spannung**

R Belastung, Verbraucher  
 $R_I$  Instrumentenwiderstand  
 $R_V$  Vorwiderstand  
 — Gleich- oder  
 ~ Wechselspannung

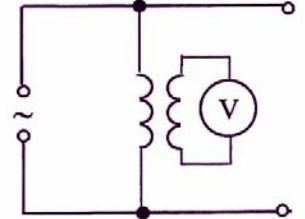


Bedingung:  $R_I \ll R$

**Meßbereichserweiterung**

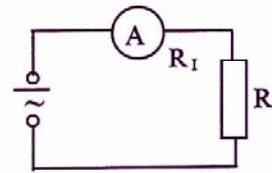


$R_V + R_I \gg R$



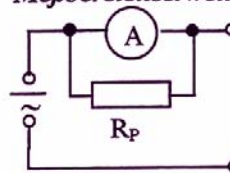
**Strom**

$R_P$  Parallelwiderstand, Shunt  
 SW Stromwandler

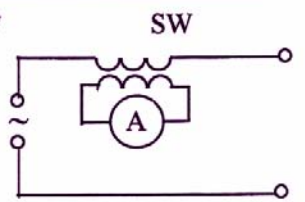


Bedingung:  $R_I \ll R$

**Meßbereichserweiterung**

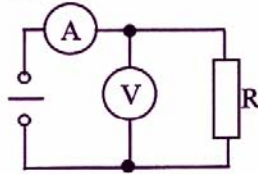


$R_I // R_P \ll R$

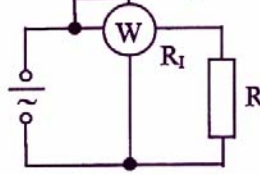


**Wirkleistung**

Gleichgrößen



Gleich- u. Wechselgrößen

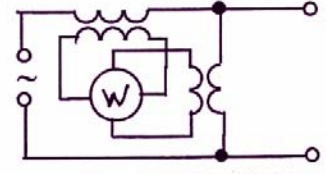


**Meßbereichserweiterung**

Gleichgrößen

Strom: Shunt  
 Spannung: Vorwiderstand

Wechselgrößen



2) Aufbau und Wirkungsweise sowie Anwendung eines elektrodynamischen Meßwerks

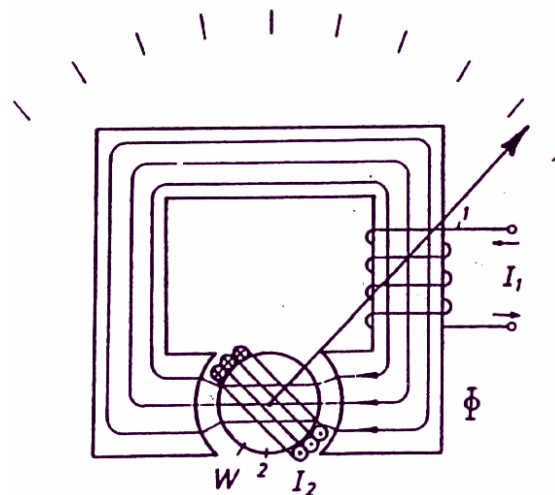
→ Aufbau: die mit dem Zeiger verbundene Drehspule befindet sich zwischen einem weichmagnetischen Kern mit feststehender Erregerspule und Eisenmantel

→ Wirkungsweise: Feldspule wird vom Verbraucherstrom  $I_1$  (Strompfad) durchflossen, während Drehspule vom Strom  $I_2$ , der der Spannung des Verbrauchers proportional ist (Spannungspfad), wird erregt → es kommt zum Zeigerausschlag

$$\alpha \sim U \cdot I = P$$

→ elektrodynamische Instrumente dienen der Messung der Leistung und sind für Gleich- und Wechselstrom geeignet

**Elektrodynamisches Meßwerk**  
**Wattmeter**



- 1 Feste Spule mit  $I_1$
- 2 Bewegliche Spule mit  $I_2$
- W Weicheisenkern

3) Leistungsmessung bei Gleich- und Wechselstrom.

für Gleichstrom

→ Anstatt Spannung und Strom nacheinander einzeln zu messen, ist es, vor allem bei schwankenden Betriebsverhältnissen, vorteilhafter, beide Größen gleichzeitig zu erfassen.

→ elektrodynamisches Messwerk (Strom „I“ im Strompfad und Klemmspannung „U“ im Spannungspfad gelangen zur Wirkung, so daß der Zeigerausschlag dem Produkt „P“ = U·I proportional ist)

→ Spannungsrichtige Schaltung: richtige Messung von der am Verbraucher liegende Spannung „R“, während der angezeigte Strom sich aus dem Verbraucherstrom „I“ und dem Strom „ΔI“ im Spannungspfad zusammensetzt. Der relative Fehler ergibt sich mit dem Widerstand des Spannungspfades „R<sub>U</sub>“ zu:  $\frac{\Delta P}{P} = \frac{R}{R_U}$

→ Stromrichtige Schaltung: Strom „I“ wird richtig angezeigt, während die Spannung sich aus der des Verbrauchers „U“ und dem Spannungsabfall „ΔU“ im Strompfad zusammensetzt. Der relative Fehler beträgt mit dem Widerstand des Strompfades „R<sub>I</sub>“:  $\frac{\Delta P}{P} = \frac{R_I}{R}$

→ bei kleinem Verbraucherwiderstand Spannungsrichtige - und bei großem Widerstand Stromrichtige Schaltung zu bevorzugen.



**Bild 4.** Widerstandsmessung durch gleichzeitige Strom- und Spannungsmessung. A Amperemeter, V Voltmeter; a Schaltung für Messung großer Widerstände; b Schaltung für Messung kleiner Widerstände

für Wechselstrom

→ in einer einphasigen Schaltung gilt für den Augenblickswert der Leistung:  $p(t) = u(t) \cdot i(t)$  sind Strom und Spannung „sinus-Größen“, so folgt mit  $\varphi = \varphi_U - \varphi_I$  und  $\varphi_\varepsilon = \varphi_U + \varphi_I$

$$p(t) = U \cdot I [\cos\varphi + \cos(2\omega t + \varphi_\varepsilon)] = P + S \cos(2\omega t + \varphi_\varepsilon)$$

→ danach schwingt die Leistung mit der 2x Frequenz des Wechselstromes um ihren Mittelwert

→ P-Wirkleistung; S-Scheinleistung

→ Definition Grundschwingungs-Blindleistung „Q“:

$$P = U \cdot I \cdot \cos\varphi; S = U \cdot I; Q = \sqrt{S^2 - P^2} = U \cdot I \cdot \sin\varphi$$

→ die Leistungswerte lassen sich in der komplexen Leistung zusammenfassen

$$S = U \cdot I^* = P + j \cdot Q$$

darin ist  $I^*$  der konjugiert komplexe Stromzeiger

#### 4) Widerstandsmessverfahren und deren Genauigkeit

- ○ nach Ohmschen Gesetz  $R = U/I$  ( gleichzeitige Messung von U und I)
- infolge der Innenwiderstände  $R_V$ ,  $R_A$  treten systematische Fehler auf, die bei genauen Messungen korrigiert werden müssen
  - Stromrichtig:  $R(U/I) - R_A$
  - Spannungsrichtig:  $R = U/(1-(U/R_V))$
- Wheatstone Brücke
  - Fehlerquellen werden vermieden durch verstellen von  $R_3$  und  $R_4$  wird das Galvanometer stromlos, die Brücke ist dann abgeglichen  $R_x/R_1 = R_4/R_3$
  - $R_x$  = Prüfling;  $R_1$  = fester Vergleichswiderstand;  $R_3, R_4$  = verstellbare Widerstände

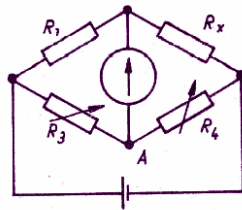


Bild 1.31. Wheatstone-Brücke

#### → Thomson Brücke

- bei sehr kleinen Widerständen ( $10^{-5}$  bis 1 Ohm) macht sich der Widerstand  $R_L$  der Zuführungsdrähte störend bemerkbar – dieser Einfluß wird bei der Thomson Brücke ausgeschaltet
- $R_x$  stellt den Prüfling und  $R_5$  einen Normalwiderstand von etwa gleicher Größe dar. Beide sind über Potentialklemmen mit den Abgleichwiderständen  $R_1$  bis  $R_4$  verbunden; für  $R_1/R_2 = R_3/R_4$  wird das Galvanometer stromlos und es gilt für den Prüfling:  $R_x = (R_1 \cdot R_5)/R_2$

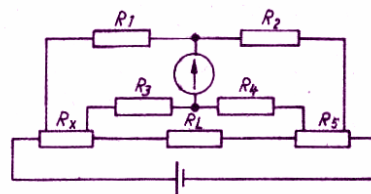
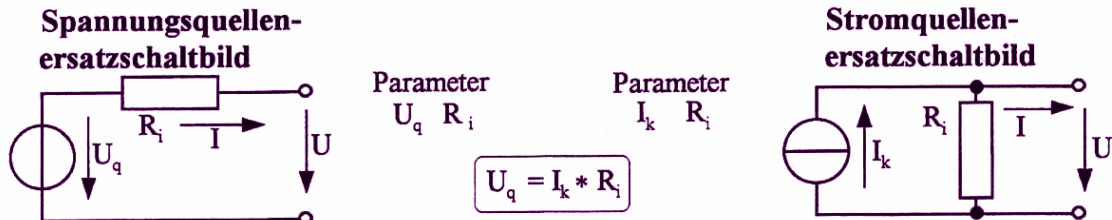


Bild 1.32. Thomson-Brücke

5) Klemmverhalten linearer aktiver Zweipole.

→ jeder aktive Zweipol, der aus Quellen und linearen Widerständen besteht, kann hinsichtlich seines Klemmverhaltens durch seine Spannungsquellen – oder Stromquellenersatzschaltung beschrieben werden.

○ für  $R_a \gg R_i$  (Energietechnik) wird Spannungsquellenersatzschaltung, und für  $R_a \approx R_i$  (Informationstechnik) wird Stromquellenersatzschaltung bevorzugt



Parameter der Ersatzquellen:

Quellenspannung	$U_q$	Spannung der idealen Spannungsquelle
Kurzschlußstrom	$I_k$	Strom der idealen Stromquelle
Innenwiderstand	$R_i$	Ersatzwiderstand des aktiven Zweipols, von den Klemmen betrachtet.

6) Leistungs- und Wirkungsgradverhalten im Grundstromkreis bei charakteristischen Betriebsfällen.

→  $I U_q = I^2 R_i + I^2 R_a$       $P_e = P_i + P_a$

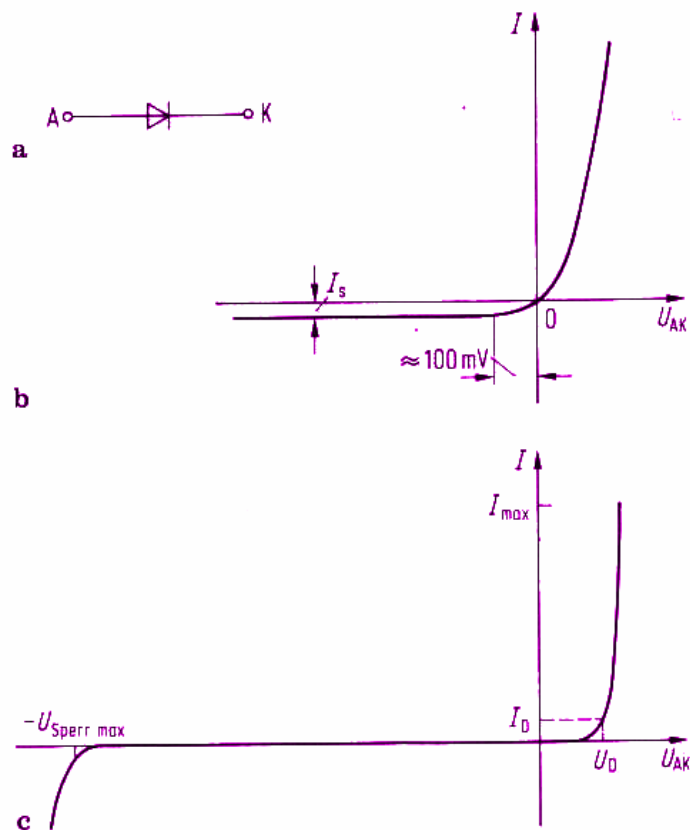
→ Wirkungsgrad:  $\eta = P_a / (P_a + P_i) = 1 / (1 + (R_i / R_a))$

→ max. Wirkungsgrad wird erreicht, wenn  $R_i = 0$  oder  $R_a = \infty$ ; weder der eine noch der andere Extremfall ist praktisch realisierbar – gegenüber dem Außenwiderstand  $R_a$  ist stets ein möglichst geringer Innenwiderstand  $R_i$  der Spannungsquelle anzustreben

7) Klemmverhalten und Anwendungen von Diode und Bipolartransistor.

→ Diode: ~ leitet den Strom bevorzugt in einer Richtung (Durchlassrichtung); die Anschlüsse werden mit Katode „K“ und Anode „A“ bezeichnet. In entgegengesetzter Richtung (Sperrichtung) kann nur ein sehr kleiner Sperrstrom fließen.

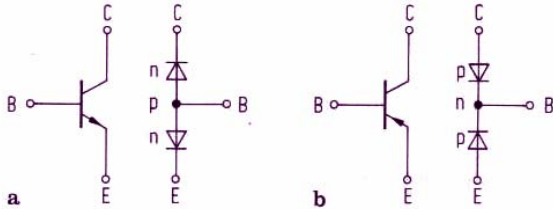
- Kennlinie ist durch Sperr- und Durchlassbereich gekennzeichnet
- Kenndaten sind temperaturabhängig –  $U_{AK}$  ändert sich ungefähr um  $-2 \text{ mV/K}$
- Gleichrichter



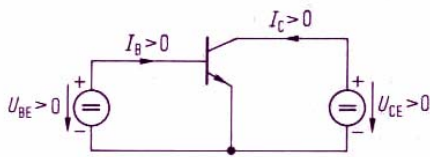
**Bild 1.** Diodenkennlinien. **a** Schaltsymbol; **b** ideale Kennlinie; **c** reale Kennlinie [4]

→ Bipolartransistor: ~ besteht aus zwei gegeneinander geschalteten Dioden mit den drei Elektroden (Basis „B“, Kollektor „C“, Emmitter „E“)

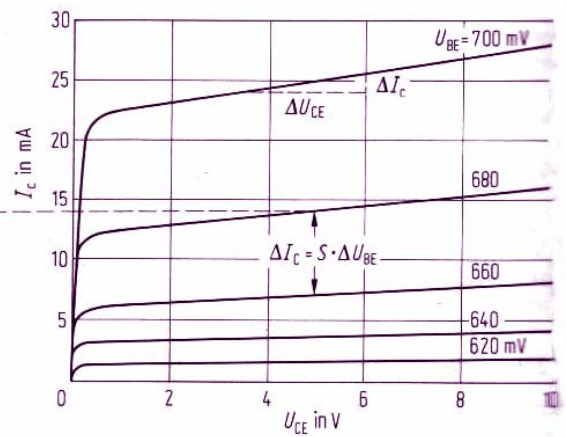
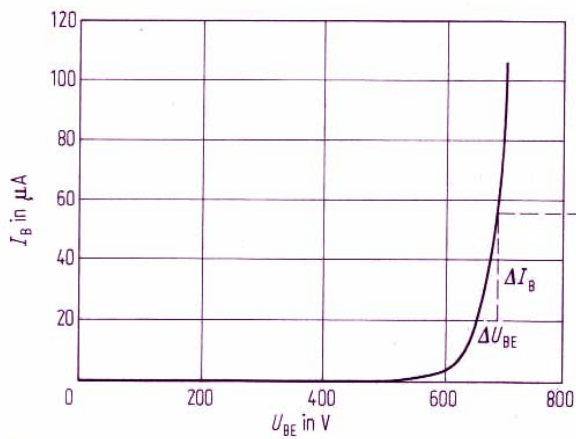
- Stromverstärkung (Signalverstärkung)
- Schaltelement



**Bild 1. a** npn-Transistor; **b** pnp-Transistor mit Dioden-Ersatzschaltbild [7]



**Bild 2.** Polung eines npn-Transistors [7]



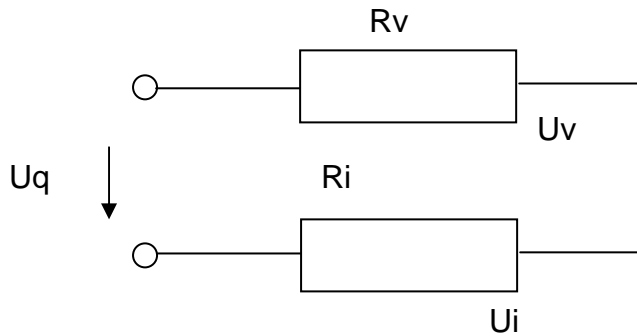
**Bild 3.**  $I_B/U_{BE}$ - und  $I_C/U_{CE}$ -Kennlinienfeld [7]



**Protokoll**

1. Meßbereichserweiterung und Fehler bei der Messung

1.1 Gegeben ist ein Drehspulmeßgerät ( $I_{max} = 250 \mu A$ ,  $R_i = 1 \text{ k}\Omega$ ), dieses Meßgerät soll zur Spannungsmessung verwendet werden. Berechnen Sie die Vorwiderstände für die Meßbereiche 1, 10 und 100 V und geben Sie die Schaltung an.



Spannungsteilerregel: 
$$\frac{U_i}{U_q} = \frac{R_i}{R_v + R_i}$$

$$R_v = \frac{U_q}{I_{max}} - R_i$$

U [V]	1	10	100
$R_v$ [k $\Omega$ ]	3	39	399

1.2 Wie groß sind die Beträge des absoluten Fehlers  $\Delta I$  und des relativen Fehlers  $\Delta I/I$ , wenn das Meßgerät eine Klassengenauigkeit 1,5 besitzt und im Meßbereich 25 mA ein Strom von  $I = 5 \text{ mA}$  angezeigt wird.

relativer Fehler: 
$$\frac{\Delta I}{I} = \pm 1,5 \cdot \frac{\text{Meßbereich}}{I} = \underline{7,5 \%}$$

absoluter Fehler: 
$$\Delta I = \text{relativer Fehler} \cdot I = \underline{\pm 0,375 \text{ mA}}$$

$$I = 5 \text{ mA} \pm 0,375 \text{ mA}$$

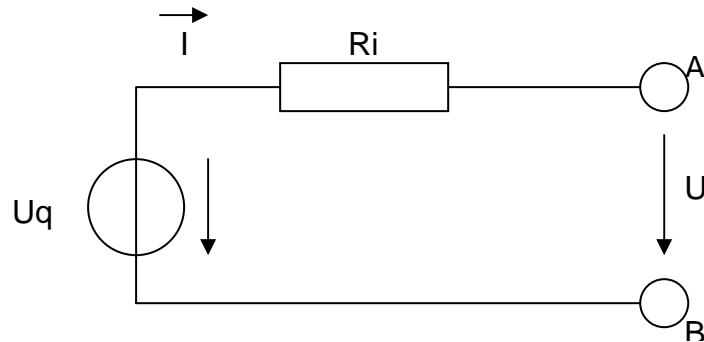
1.3 Bei einem Digitalmultimeter mit 3 stelligem Anzeigebereich 000...999 mV beträgt der digitale Restfehler  $\pm 1$  in der letzten Stelle. Wie groß sind die jeweiligen relativen Fehler, wenn damit Spannungen von 1, 10, 100 und 900 mV gemessen werden?

U [mV]	1	10	100	900
$\Delta U$ [mV]	$\pm 1$	$\pm 1$	$\pm 1$	$\pm 1$
$\Delta U/U$	1 $\rightarrow$ 100%	0,1 $\rightarrow$ 10%	0,01 $\rightarrow$ 1%	0,0011 $\rightarrow$ 0,11%

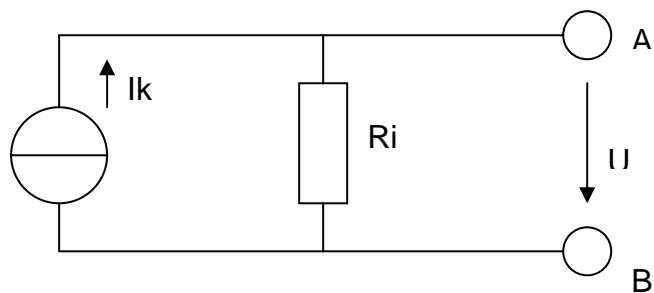
3. Messungen an aktiven und passiven Zweipolen

3.1 Geben Sie die einfachsten möglichen Ersatzschaltungen eines aktiven Zweipoles an.

Spannungsquellenersatzschaltbild



Stromquellenersatzschaltbild



3.2 Gegeben ist ein aktiver Zweipol bestehend aus einer Spannungsquelle  $U_q$  und einem Innenwiderstand  $R_i$ . Berechnen Sie die an  $R_a$  und  $R_i$  umgesetzten normierten Leistungen  $P_a/P_k$  und  $P_i/P_k$  als Funktion von  $R_a/R_i$  und stellen Sie sie graphisch dar ( $P_k = U_q^2/R_i$ ). Wo befindet sich das Maximum von  $P_a$  und wie groß sind  $P_a/P_k$  und  $P_i/P_k$  an dieser Stelle?

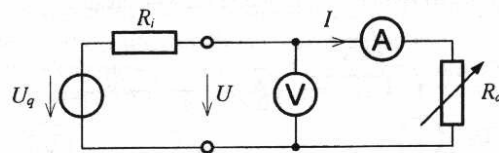
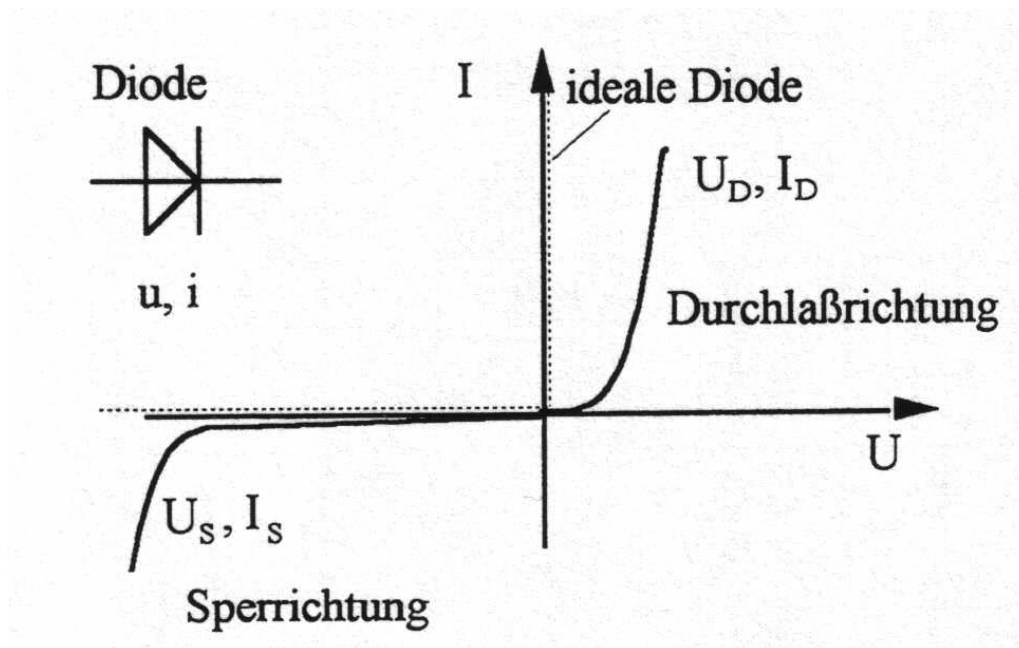


Bild 1

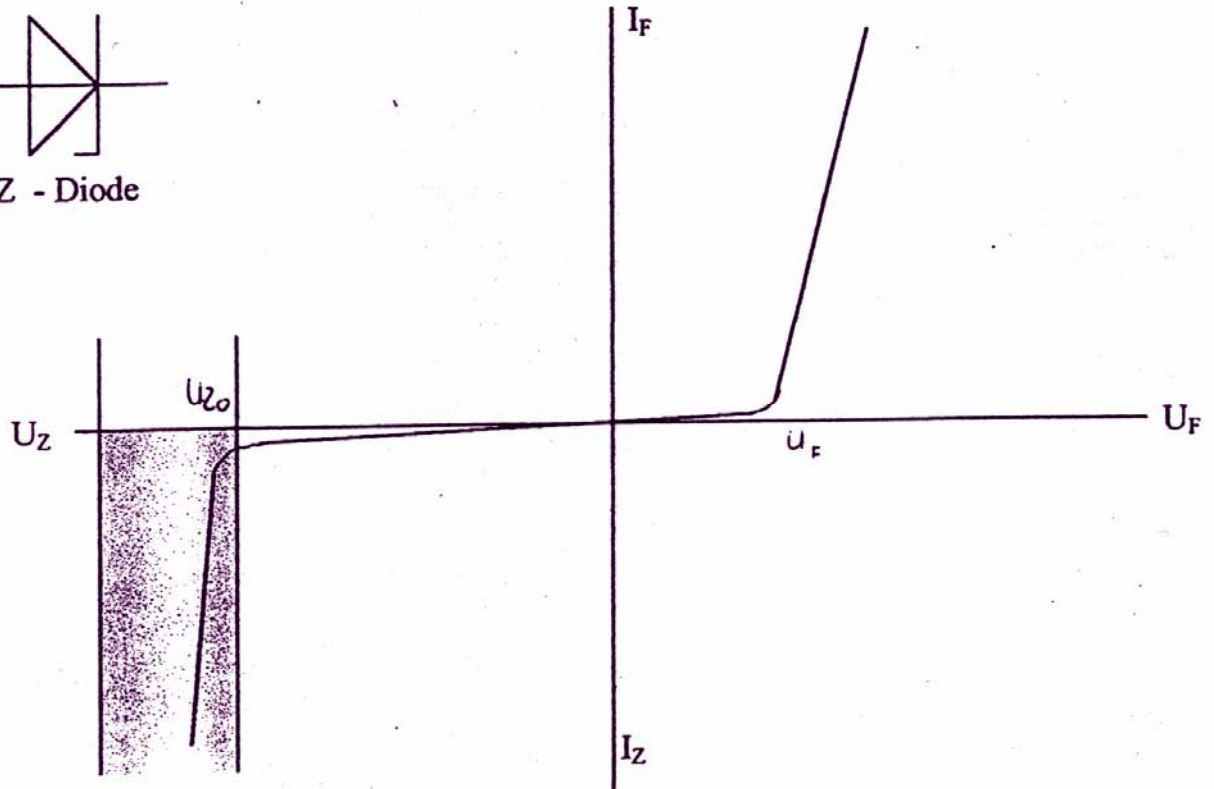
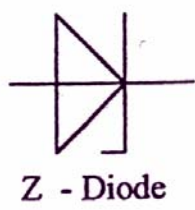
4. Gleichrichterdiode

- 4.1 Skizzieren Sie die U-I-Kennlinie einer realen Diode und die Approximation dieser Kennlinie durch zwei Geradenstücke. Geben Sie die charakteristischen Betriebsbereich an.



5. Z-Diode

5.1 U-I-Kennlinie, skizzieren Sie den praktisch interessierenten Bereich.



## 6. Lichtemiterelektrode LED

6.1 Bestimmen Sie den Vorwiderstand einer LED für die Werte:  $U_q = 6V$ ,  $I_F = 20mA$ ,  $U_F = 1,6 V$ .

$$U_q = U_F + U_V$$

$$R_V = U_V / I_V$$

$$I_V = I_F$$

$$U_V = U_q - U_F$$

$$R_V = (U_q - U_F) / I_F = (6V - 1,6V) / 30 \cdot 10^{-3} A = \underline{220 \Omega}$$

## 7. Kennlinien eines Bipolartransistors

7.1 Zeichnen Sie das Ausgangskennlinienfeld  $I_C = f(U_{CE}, I_B)$  eines Bipolartr. und erläutern Sie den Begriff Stromverstärkung.

Stromverstärkung: Zusammenhang zwischen Ausgangsstrom  $I_C$  (Kollektorstrom) und Eingangsstrom  $I_B$  (Basisstrom).

→  $I_C / I_B \gg 1$

